

数控机床几何误差相关性分析方法研究

郭世杰^{1,2} 梅雪松^{1,2} 姜歌东^{1,2} 张东升^{1,2} 惠阳^{1,2}

(1. 西安交通大学机械学院, 西安 710049; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 为提高数控机床的精度, 降低装配、制造过程产生的几何误差的影响, 基于多体系统理论建立几何误差模型, 在误差相关性分析的基础上, 提出了一种辨识关键性几何误差元素的方法。首先, 基于多体系统理论及齐次坐标变换方法建立了三轴数控机床几何误差模型, 构建了几何误差元素相关性分析模型。其次, 采用拉丁超立方抽样方法在整个参数空间内抽样, 有效避免了单因素分析的缺陷。最后, 通过计算拉丁立方抽样确定的误差元素引起的空间几何误差, 进行相关性分析并辨识影响机床精度的关键几何误差元素。误差补偿后的圆测试对比结果表明, 该方法可判别影响数控机床空间精度的重要误差元素, 并能够定量辨识误差元素对几何误差向量的作用效果, 可为机床误差补偿及精度分配提供重要的理论参考。

关键词: 数控机床; 多体系统理论; 几何误差; 关键误差元素; 相关性分析; 误差补偿

中图分类号: TH161 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0383-07

Correlation Analysis of Geometric Error for CNC Machine Tool

Guo Shijie^{1,2} Mei Xuesong^{1,2} Jiang Gedong^{1,2} Zhang Dongsheng^{1,2} Hui Yang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of NC machine tool and reduce the influence of geometric errors caused by assembly and manufacturing process, the geometric error model was established based on multi-body system theory, and a new method of identifying key elements of the geometric errors was proposed on the basis of geometric errors correlation analysis. Firstly, geometric errors model of three-axis vertical CNC machine tools was derived by using multi-body system theory and homogeneous coordinate transformation method, and correlation analysis model of the geometric error elements was established, which contained 21 geometric errors of three-axis NC machine tools. Secondly, to avoid the defects of single factor analysis, and considering the coupling effects of geometric error elements, Latin hypercube sampling method was used in the whole parameter space sampling. Finally, based on the geometric error model and correlation analysis model, spatial error was calculated by using geometric errors element which was determined by Latin cube sample. And the key geometric error elements that affected the accuracy of machine tool were analyzed. Before error compensation, the twelve-line method was applied to identify the geometric error elements for each axis based on Renishaw XL-80 laser interferometer measuring system. The comparison result of circular tests after error compensation showed that the method can effectively and quantificationally identify the key factors that affecting the precision of machine tool space and the effects of error elements of total space error, thus important theoretical foundation was provided for accuracy allocation and error compensation of machine tool reasonably.

Key words: CNC machine tool; multi-body system theory; geometric error; key geometric error element; correlation analysis; error compensation

收稿日期: 2016-03-29 修回日期: 2016-05-02

基金项目: 国家科技重大专项(2014ZX04001051)

作者简介: 郭世杰(1985—), 男, 博士生, 主要从事数控技术研究, E-mail: 710862666@qq.com

通信作者: 姜歌东(1970—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事数字控制和制造技术及精密机械研究, E-mail: gjjiang@mail.xjtu.edu.cn

引言

几何误差是影响机床精度的关键因素。在进给量较小、温度可控的条件下,机床的几何误差成为高精密数控机床的最大误差源,约占总误差的50%^[1]。几何误差在数控机床较长工作时间内具有可重复性,因此,预测分析几何误差的影响是控制机床精度的前提。

通过误差防止和误差补偿可有效控制几何误差因素的影响^[2]。实现误差防止和误差补偿均需要对影响机床精度的误差元素精确建模^[3],从而准确地预测几何误差。综合分析现有关于机床几何误差建模的研究,几何误差建模预测方法有三角关系法^[4]、多项式模型法^[5-6]、机构学法^[7]、神经网络和支持向量机^[8]、坐标系间的微分变换表达式^[9]、图形识别法^[10]和牛顿插值法^[11]等。与上述方法相比,基于多体系统理论和齐次坐标变换方法可将数控机床的复杂运动问题转换为多个相邻体之间坐标系的相对运动,从而简化问题的复杂性,使误差影响的表达更直观。在机床设计、制造及误差补偿阶段辨识影响机床精度的关键误差项是从源头提升机床精度的有效手段。TSUTSUMI等^[12]通过仿真和实验研究了与转动轴相关的各项几何误差对机床精度的影响。余文利等^[13]通过测量辨识所得几何误差项分析了三轴机床工作空间误差分布特征,并基于软件生成了补偿代码。CHEN等^[14]利用矩阵微分法分析了五轴机床几何误差对机床精度的影响,并将分析结果成功应用于机床设计、制造中。矩阵微分法也被用于分析三轴机床的关键误差项^[15]。通过实验对比分析,韩飞飞等^[16]研究了定位误差,直线度误差,垂直度误差与空间综合误差的耦合关系。余治民等^[17]针对大型数控龙门导轨磨床,建立了加工精度可靠性极限状态函数,并对影响机床加工精度的误差元素进行重要度排序。高猛等^[18]利用微分方法,分析了影响并联机床的结构参数之间及参数与输出误差的相关性。

几何误差呈现非线性特征,同时误差元素之间存在耦合作用^[19],各项几何误差对机床整体精度的影响权重各异。针对误差的非线性和相关性特征,亟需从误差预防和误差补偿角度分别进行误差溯源分析和关键误差项补偿研究。而且,目前针对机床误差元素相关性的研究深度不够。

鉴于此,本文首先以三轴数控机床为研究对象,建立三轴数控机床的几何误差模型,然后基于拉丁立方抽样的 Spearman 系数进行几何误差相关性分

析。最后,根据几何误差模型与相关性分析模型辨识机床各部件几何误差对机床精度的影响,并进行基于误差补偿的圆加工实验。

1 数控机床几何误差建模

1.1 三轴数控机床的几何误差

依据刚体运动原理,物体在笛卡儿坐标系中存在6个自由度。对于机床运动轴其表现形式为6项几何误差。以X轴为例,6项误差如图1所示。

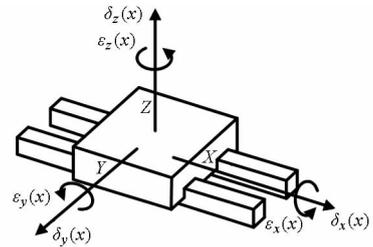


图1 X轴几何误差示意图

Fig.1 Schematic of geometric error elements of X-axis

Y轴和Z轴包含的几何误差项与X轴相似。同时每一对运动轴之间有一项垂直度误差,所以,三轴数控机床包含21项几何误差,如表1所示。

表1 三轴机床几何误差项

Tab.1 Geometric error elements of three-axis machine tool

误差元素	符号
定位误差	$\delta_x(x), \delta_y(y), \delta_z(z)$
直线度误差	$\delta_y(x), \delta_z(x), \delta_x(y), \delta_z(y), \delta_x(z), \delta_y(z)$
角度误差	$\epsilon_x(x), \epsilon_y(x), \epsilon_z(x), \epsilon_x(y), \epsilon_y(y), \epsilon_z(y), \epsilon_x(z), \epsilon_y(z), \epsilon_z(z)$
垂直度误差	S_{xy}, S_{yz}, S_{xz}

其中, $\delta_i(j)$ 表示定位误差及线性误差,相应的*i*表示误差所在方向,*j*表示位置坐标, $\epsilon_i(j)$ 表示角度误差,相应的*j*表示位置坐标,*i*表示误差所在方向。 S_{ij} 表示*i*与*j*轴之间的垂直度误差。

1.2 三轴机床的几何误差模型

XYFZ型三轴数控机床结构如图2所示,在初始状态下,参考坐标系*R*建立在床身,机床各部件局部坐标系*X*、*Y*、*Z*、*S*、*T*、*W*分别建立在*X*、*Y*、*Z*方向工作台、主轴*S*、刀具*T*和工件*W*上。各局部坐标系方向与参考坐标系一致。

在理想状态下,各运动部件分别沿*X*、*Y*、*Z*方向移动*x*、*y*、*z*时,相邻部件之间的固联坐标系可以通过齐次坐标变换矩阵表示其运动关系,即

$${}^X_y T^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

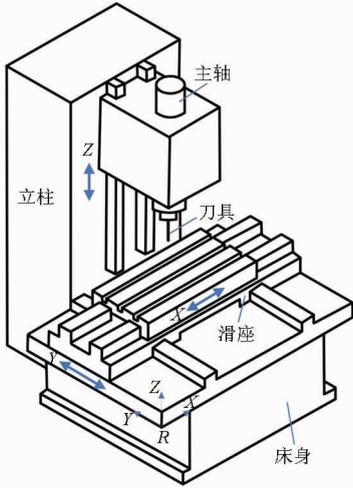


图2 三轴数控机床结构示意图

Fig.2 Structure schematic of three-axis machine tool

$${}^Y_R T^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^R_Z T^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

刀具坐标系与主轴坐标系之间的关系为

$${}^S_T T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & D_1 \\ 0 & 1 & 0 & D_2 \\ 0 & 0 & 1 & D_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 D_1 、 D_2 、 D_3 ——刀具坐标系在主轴坐标系下的位置坐标

${}^n_m T^i$ ——理想状态下 m 坐标系到 n 坐标系的齐次坐标变换矩阵

刀尖点位置坐标在工件坐标系的位置可表示为

$${}^W_T T^i = {}^X_T T^i {}^Y_T T^i {}^R_T T^i {}^Z_T T^i {}^S_T T^i {}^T_T T^i \quad (5)$$

在实际运动状态下,机床受21项几何误差的影响, ${}^n_m T^e$ 表示几何误差存在状态下 m 坐标系到 n 坐标系的齐次坐标变换,各运动轴分别沿 X 、 Y 、 Z 方向移动时,相应的误差特征矩阵为

$${}^X_Y T^e = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(x) & \varepsilon_y(x) & \delta_x(x) \\ \varepsilon_z(x) & 1 & -\varepsilon_x(x) & \delta_y(x) \\ -\varepsilon_y(x) & \varepsilon_x(x) & 1 & \delta_z(x) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^Y_R T^e = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(y) & \varepsilon_y(y) & \delta_x(y) - yS_{xy} \\ \varepsilon_z(y) & 1 & -\varepsilon_x(y) & \delta_y(y) \\ -\varepsilon_y(y) & \varepsilon_x(y) & 1 & \delta_z(y) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^R_Z T^e = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_z(z) & \varepsilon_y(z) & \delta_x(z) - zS_{xz} \\ \varepsilon_z(z) & 1 & -\varepsilon_x(z) & \delta_y(z) - zS_{yz} \\ -\varepsilon_y(y) & \varepsilon_x(z) & 1 & \delta_z(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

此时,刀尖点位置坐标在工件坐标系下的位置可表示为

$${}^W_T T^e = {}^X_T T^i {}^Y_T T^i {}^R_T T^i {}^Z_T T^i {}^S_T T^i {}^T_T T^i \quad (9)$$

由式(9)可知,刀具成形点在几何误差的作用下将不可避免的与理想位置发生偏离,因此三轴数控机刀尖点位置偏差可以表示为

$$\mathbf{E}(\mathbf{E}_x, \mathbf{E}_y, \mathbf{E}_z) = ({}^W_T T^e - {}^W_T T^i) [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (10)$$

将方程(1)~(9)代入方程(10),忽略三阶及以上几何误差项,能够得到沿 X 、 Y 、 Z 方向的几何误差向量分量。其表示形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_x = & \delta_x(z) + \delta_x(x) + \delta_x(y) - y(\varepsilon_z(x) + S_{xy}) + \\ & D_1 + \varepsilon_y(x)(\delta_z(y) + \delta_z(z)) + \varepsilon_y(y)\delta_z(z) + \\ & D_2(-\varepsilon_z(x) - \varepsilon_z(y) - \varepsilon_z(z)) - \varepsilon_z(x)(\delta_y(y) + \\ & \delta_y(y)) + z(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) - S_{xz} + \varepsilon_z(x)\varepsilon_x(y) + \\ & \varepsilon_z(x)S_{yz} + \varepsilon_z(y)S_{yz}) + \\ & D_3(\varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) + \varepsilon_y(z) + \varepsilon_x(y)\varepsilon_z(x) + \\ & \varepsilon_x(z)\varepsilon_z(x) + \varepsilon_x(z)\varepsilon_z(y)) - \varepsilon_z(y)\delta_y(z) \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_y = & \delta_y(z) + \delta_y(x) + \delta_y(y) + D_1(\varepsilon_z(y) + \varepsilon_z(x) + \\ & \varepsilon_z(z)) + D_2 + \delta_z(x)(\delta_x(y) + \delta_x(z)) - y\varepsilon_z(x)S_{xy} - \\ & \varepsilon_x(y)\delta_z(z) - z(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) + S_{yz} - \varepsilon_y(y)\varepsilon_z(x) + \\ & \varepsilon_z(x)S_{xz} + \varepsilon_z(y)S_{xz}) - D_3(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(z) - \\ & \varepsilon_y(y)\varepsilon_z(x) - \varepsilon_y(z)\varepsilon_z(x) - \varepsilon_y(z)\varepsilon_z(y)) + \\ & \delta_x(z)\varepsilon_z(y) - \varepsilon_x(x)(\delta_z(y) + \delta_z(z)) \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_z = & \delta_z(x) + \delta_z(y) + \delta_z(z) + y(\varepsilon_y(x)S_{xy} + \\ & \varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(x)(\delta_y(y) + \delta_y(z)) - \delta_x(z)\varepsilon_y(y) - \\ & z(\varepsilon_x(x)S_{yz} + \varepsilon_x(y)\varepsilon_x(x) - \varepsilon_y(x)\varepsilon_y(y) - \\ & \varepsilon_y(y)S_{xz} + \varepsilon_x(y)S_{yz}) - \varepsilon_y(x)(\delta_x(y) + \delta_x(z)) - \\ & D_3(\varepsilon_x(y)\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(z)\varepsilon_x(x) + \varepsilon_y(y)\varepsilon_y(x) + \\ & \varepsilon_y(z)\varepsilon_y(x) + \varepsilon_x(y)\varepsilon_x(z) + \varepsilon_y(y)\varepsilon_y(z)) + \\ & \varepsilon_x(y)\delta_y(z) + D_1(-\varepsilon_y(x) - \varepsilon_y(y) - \varepsilon_y(z)) + \\ & D_2(\varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) + \varepsilon_x(z)) \quad (13) \end{aligned}$$

总空间误差向量 \mathbf{E}_t 可以表示为

$$\mathbf{E}_t = \sqrt{\mathbf{E}_x^2 + \mathbf{E}_y^2 + \mathbf{E}_z^2} \quad (14)$$

建立的几何误差模型包含了三轴数控机床的

21项几何误差。据此,可预测几何误差对精度的影响,同时也可通过分析数控机床各几何误差项与 X 、 Y 、 Z 3个方向的分量 \mathbf{E}_x 、 \mathbf{E}_y 、 \mathbf{E}_z 以及空间误差 \mathbf{E}_t 的关系,从而可辨识出与空间几何误差关联密切的误差项。

2 几何误差元素拉丁超立方抽样

依据数控机床几何精度检验标准 GB/T 20957.2—2007 可定义几何误差元素数值大小。为提升机床精度、满足设计需要,机床设计过程中需采用控制压缩系数来保证机床设计精度。因此几何误差的取值依据工厂标准定义为标准值的0.8倍。21项几何误差服从均匀分布,定位误差位于 $[0,3]$ (μm),直线度误差位于 $[0,4]$ (μm),角度误差位于 $[0,3.2 \times 10^{-5}]$ (rad),垂直度误差位于 $[0,1.9]$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)。

利用拉丁超立方抽样方法在整个参数空间对几何误差参数进行抽样。拉丁超立方抽样方法与蒙特卡洛方法相比,具有抽样次数较少、所获得的样本数量均匀、有效避免重复抽样的优点。几何误差元素抽样的实现过程如下:

(1) 定义 j 个几何误差元素构成参数集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_j\}$ ($j \leq 21$),每一个参数等概率的在 k 个水平点上取值。

(2) 对几何误差元素 x_j 在其取值空间内抽取样本 \mathbf{x}_j^k ,角标 j 与 k 分别代表第 j 个几何误差元素的第 k 次抽样,则每个几何误差元素含有 k 个样本。

(3) 定义 $j \times k$ 阶随机抽样矩阵,矩阵的行是第 j 个随机抽样几何误差元素,矩阵的列是各随机抽样几何误差元素 k 个水平点上的数值。

(4) 每次从随机抽样矩阵的列中依次抽取各几何误差元素的一个样本值,进行 k 次抽样后形成几何误差元素集 $\{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ 。

依据误差元素的分布函数,进行500次随机抽样模拟运算。将几何误差元素集 $\{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ 内的元素代入几何误差模型内可得到21项几何误差元素对应的误差向量集 $\{\mathbf{E}_{t1}, \mathbf{E}_{t2}, \dots, \mathbf{E}_{tk}\}$,定义几何误差元素 x_j^m 在几何误差元素集 $\{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ 内的秩是 λ_m , \mathbf{E}_{tm} 在误差向量集 $\{\mathbf{E}_{t1}, \mathbf{E}_{t2}, \dots, \mathbf{E}_{tk}\}$ 中的秩是 μ_m ,则几何误差的 Spearman 秩相关系数 \mathbf{R}_s 可表示为

$$\mathbf{R}_s = \frac{k \sum_{m=1}^k \lambda_m \mu_m - \sum_{m=1}^k \lambda_m \sum_{m=1}^k \mu_m}{\sqrt{k \sum_{m=1}^k \lambda_m^2 - \left(\sum_{m=1}^k \lambda_m \right)^2} \sqrt{k \sum_{m=1}^k \mu_m^2 - \left(\sum_{m=1}^k \mu_m \right)^2}} \quad (15)$$

\mathbf{R}_s 反映几何误差参数 X_i 与误差向量 \mathbf{E}_i ($i = x, y, z, t$)之间的相关性, \mathbf{R}_s 的取值范围为 $-1 \sim 1$ 。 \mathbf{R}_s 数值为正,误差向量 \mathbf{E}_i 随第 i 个几何误差元素 X_i 的增大而增大; \mathbf{R}_s 数值为负,误差向量 \mathbf{E}_i 随第 i 个几何误差元素 X_i 的增大而减小;同时, \mathbf{R}_s 绝对值则揭示误差向量 \mathbf{E}_i 与 x_i 之间的相关程度。

3 相关性分析

几何误差元素之间存在一定的相关性,通过相关性分析可确定几何误差元素与误差向量相关关系密切程度。相关系数体现了对应的几何误差与误差向量之间相关性。在一定程度上该几何误差元素可以反映误差分量或误差向量的特性。与 Pearson 系数、kendall 系数、偏相关系数相比,Spearman 系数可评价误差元素呈非线性分布特征、强耦合作用对空间误差的影响。将几何误差代入误差模型方程式(11)~(14)中可获得相应的空间误差向量,最后对参数的 Spearman 系数进行排序,分析结果如图3所示。

由图3a可知,相关系数绝对值较大的前8组误差元素是 $\delta_x(z)$ 、 $\delta_x(y)$ 、 $\delta_x(x)$ 、 $\varepsilon_z(x)$ 、 $\delta_y(x)$ 、 $\varepsilon_x(z)$ 、 $\varepsilon_y(z)$ 、 S_{yz} ,对应的相关性系数分别为0.625、0.522、0.369、-0.353、0.315、-0.227、-0.217、-0.212,即上述8项几何误差是影响误差分量 \mathbf{E}_x 的关键误差元素。由图3b可知,相关系数绝对值较大的前8组是 $\delta_z(x)$ 、 $\varepsilon_z(z)$ 、 $\delta_x(z)$ 、 S_{yz} 、 $\delta_x(y)$ 、 $\varepsilon_z(x)$ 、 $\varepsilon_y(z)$ 、 $\delta_y(x)$,对应的相关性系数分别为0.761、0.634、0.629、-0.318、0.278、-0.263、-0.227、0.185,即上述8项几何误差是影响误差分量 \mathbf{E}_y 的关键误差元素。由图3c可知,相关系数绝对值较大的前8组是 $\delta_z(x)$ 、 $\delta_z(y)$ 、 $\delta_z(z)$ 、 S_{yz} 、 $\delta_y(x)$ 、 $\varepsilon_y(z)$ 、 $\varepsilon_z(z)$ 、 $\delta_x(x)$,对应的相关性系数分别为0.664、0.551、0.375、-0.371、-0.365、-0.323、-0.238、-0.200,即上述8项几何误差是影响误差分量 \mathbf{E}_z 的关键误差元素。由图3d可知,相关系数绝对值较大的前8组是 $\delta_z(x)$ 、 $\delta_x(z)$ 、 S_{yz} 、 $\delta_x(y)$ 、 $\varepsilon_z(x)$ 、 $\varepsilon_y(z)$ 、 $\varepsilon_z(z)$ 、 $\delta_y(x)$,对应的相关性系数分别为0.750、0.634、-0.356、0.307、-0.293、-0.282、-0.205、0.158,即上述8项几何误差是影响误差分量 \mathbf{E}_t 的关键误差元素。

由以上的误差向量与误差元素的相关性系数可知,在 \mathbf{E}_x 、 \mathbf{E}_y 、 \mathbf{E}_z 和 \mathbf{E}_t 中相关性系数较小的误差元素是 $\varepsilon_x(y)$ 、 $\varepsilon_y(x)$ 、 $\varepsilon_y(y)$ 、 $\varepsilon_z(y)$ 、 $\delta_y(z)$ 、 $\delta_y(y)$ 、 S_{xy} 、 S_{xz} ,上述8项几何误差元素相关性系数低于4项几何误差向量 \mathbf{E}_x 、 \mathbf{E}_y 、 \mathbf{E}_z 和 \mathbf{E}_t 组内相关性系数的均值,即上述8项误差对误差向量的影响较弱。此外,由

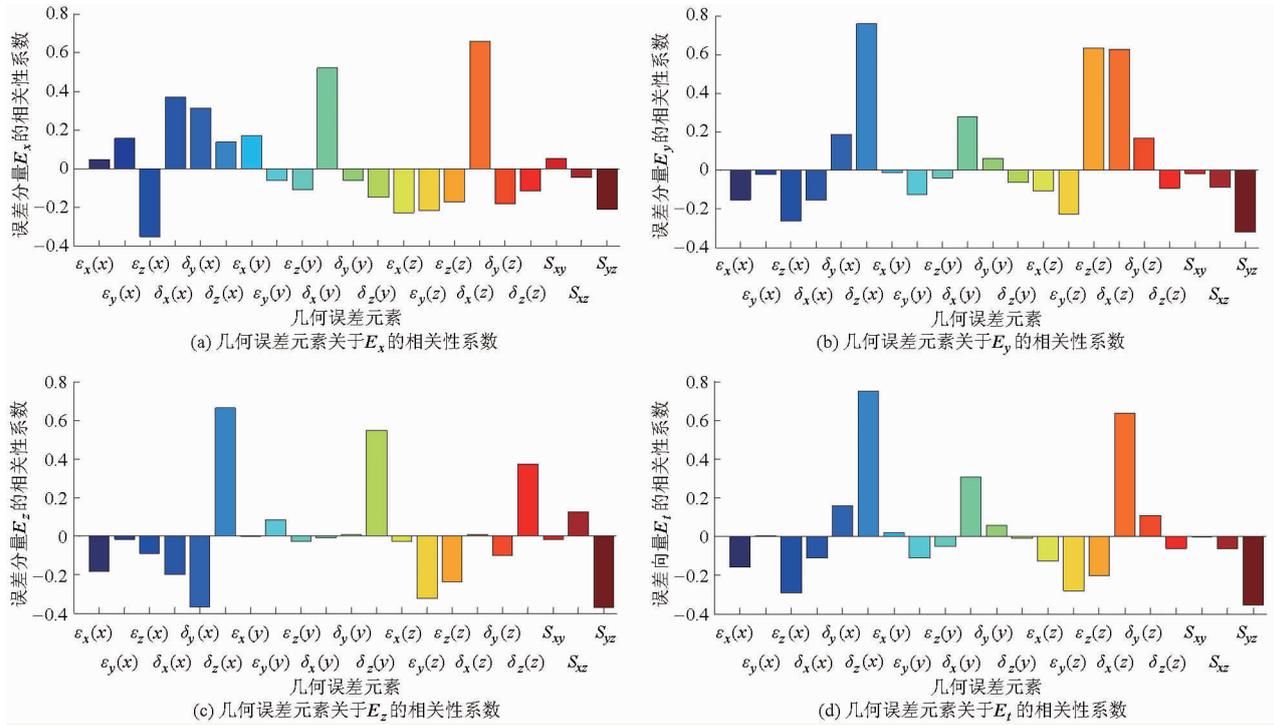


图 3 几何误差元素关于误差向量的相关性系数

Fig. 3 Correlation coefficients of geometric errors with respect to error vector

图 3 可知, 直线度误差及定位误差相关性系数较大, 则该类误差对空间几何误差影响较为严重。角度误差及 X 轴与 Y 、 Z 轴垂直度误差 (S_{xy}, S_{xz}) 相关性系数较小, 该类误差对空间几何误差影响较小。在补偿阶段, 当机床在几何误差分量相对应的方向上运动时, 可通过控制对误差分量影响较为严重的几何误差元素提升机床精度。

4 实验验证

为验证几何误差相关性分析的有效性, 本研究在已搭建的具有开放式数控系统的三轴铣床上进行实验^[20]。利用十二线法对影响三轴机床精度的 21 项几何误差进行测量、辨识^[21], 如图 4 所示。所获取的辨识值作为补偿值直接应用于几何误差补偿。

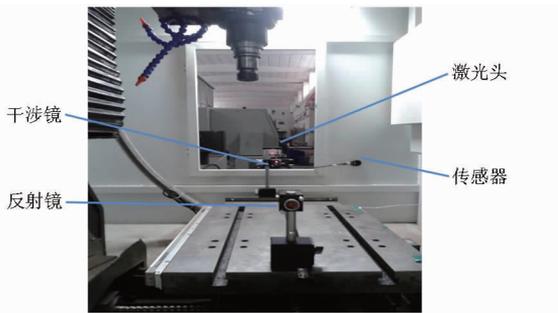


图 4 几何误差测量

Fig. 4 Measurement of geometric errors

依据精密加工中心几何精度检验标准^[22]在三轴机床上进行圆测试。实验设计的测试轨迹如图 5a 所示。在进行轨迹 A 测量时, 对相关性系数较小的角

度误差和垂直度误差补偿后进行圆轨迹测试。在进行圆轨迹 B 测量时, 对定位误差、直线度误差、角度误差和垂直度误差补偿后进行圆轨迹测试。 X 、 Y 轴联动, 进给速度 $F = 500 \text{ mm/min}$, 两圆轨迹 A、B 测量安装如图 5b 所示。

A 与 B 2 个圆轨迹的测量对比数据如表 2 所示。

表 2 轨迹 A、B 误差对比

Tab. 2 Comparison of errors at A and B circular motions

误差项	轨迹 A	轨迹 B
垂直度误差/ $(\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1})$	18.7	5.3
圆度误差/ μm	25.2	6.9
中心偏置精度 $x, y/\mu\text{m}$	-17.6, 2.7	-8.4, 1.2

由测量结果(图 5c、5d)可知: 轨迹 A 与轨迹 B 相比, 垂直度、圆度分别提升了 71.7%、72.6%, 圆轨迹的中心偏置精度在 x 和 y 方向上分别增大了 52.3% 和 55.6%。圆轨迹测试结果表明, 定位误差和直线度误差对机床精度的影响比角度误差和直线度误差的影响明显, 测量数据结果与误差相关性分析一致。

5 结论

(1) 基于多体系统理论和齐次坐标变换方法, 综合考虑机床部件的几何误差, 对三轴数控机床建立了几何误差预测建模, 并依据误差元素与机床精度的关系建立了相关性分析模型。

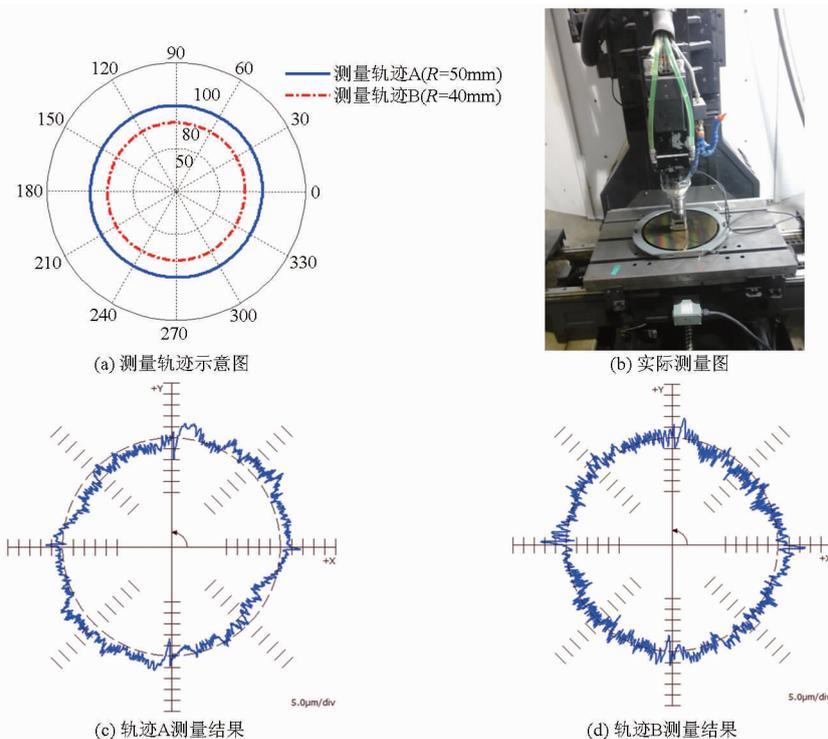


图5 测量安装及测量结果

Fig. 5 Experimental setup and measurement results

(2) 采用拉丁超立方抽样方法在几何误差元素空间内抽样,并用相关系数对几何误差元素随机输入样本集与其对应的空间误差向量集作相关性分析,与传统提取误差元素在参考值的 $\pm 10\% \sim \pm 20\%$ 范围相比,更具有实际应用意义,同时从设计角度考虑误差元素对机床空间精度的定量影响,为机床概念设计之后的精度分配提供了一种分析方法。

(3) 对三轴数控机床进行误差相关性分析可知,直线度误差、定位误差及 Z 轴导轨与 Y 轴导轨的垂直度误差对机床空间精度影响较为严重。该方法最终识别了影响机床加工精度的关键性误差,并通过误差补偿验证了分析结果的有效性。所得相关性系数可作为机床精度分配权重,从而为精密数控机床的设计提供重要的理论参考。

参 考 文 献

- 1 NI J. CNC machine accuracy enhancement through real time error compensation [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119(4B): 717–725.
- 2 FAN K G, YANG J G, YANG L. Unified error model based spatial error compensation for four types of CNC machining center: part II—unified model based spatial error compensation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 49 (1–2): 63–76.
- 3 余文利, 姚鑫骅, 孙磊, 等. 基于 PLS 和改进 CVR 的数控机床热误差建模[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 357–364. YU Wenli, YAO Xinhua, SUN Lei, et al. Thermal error modeling of CNC machine tool based on partial least squares and improved core vector regression [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 357–364. (in Chinese)
- 4 FRENCH D, HUMPHRIES S H. Compensation for backlash and alignment errors in a numerically controlled machine tool by a digital computer program [C]//Proceedings of the 8th International MTDR Conference, 1967: 167–172.
- 5 FERREIRA P M, LIU C R. An analytical quadratic model for the geometric error of a machine tool [J]. Journal of Manufacturing Systems, 1986, 5(1): 51–63.
- 6 郭然, 付国强, 孙磊, 等. 基于切比雪夫多项式的数控机床几何误差参数化建模[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 336–343. GUO Ran, FU Guoqiang, SUN Lei, et al. Chebyshev polynomials based parametric modeling of geometric errors for CNC machine tools [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 336–343. (in Chinese)
- 7 KIRIDENA V, FERREIRA P. Mapping the effects of positioning errors on the volumetric accuracy of five-axis CNC machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1993, 33(3): 417–437.
- 8 YAO X, FU J, XU Y, et al. Synthetic error modeling for NC machine tools based on intelligent technology [J]. Procedia CIRP, 2013, 10: 91–97.
- 9 FU G, FU J, XU Y, et al. Accuracy enhancement of five-axis machine tool based on differential motion matrix: geometric error modeling, identification and compensation [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89: 170–181.
- 10 WANG W, ZHANG Y, YANG J, et al. Geometric and thermal error compensation for CNC milling machines based on Newton

- interpolation method [J]. Proc IMech E, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2013, 227(4):771-778.
- 11 杜柳青, 周武. 基于图形识别的数控机床误差溯源方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10):391-396.
DU Liuqing, ZHOU Wu. Method for machine tool's motion error abduction based on graphic recognition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10):391-396. (in Chinese)
- 12 TSUTSUMI M, SAITO A. Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(8):771-780.
- 13 余文利, 付国强, 孙磊, 等. 数控加工中心空间误差场建模与仿真软件开发[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4):382-390.
YU Wenli, FU Guoqiang, SUN Lei, et al. Error field modeling and simulation software developing for CNC machining center [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4):382-390. (in Chinese)
- 14 CHEN G, LIANG Y, SUN Y, et al. Volumetric error modeling and sensitivity analysis for designing a five-axis ultra-precision machine tool [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9-12):2525-2534.
- 15 程强, 刘广博, 刘志峰, 等. 基于敏感度分析的机床关键性几何误差源识别方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(7):171-179.
CHENG Q, LIU G B, LIU Z F, et al. An identification approach for key geometric error sources of machine tool based on sensitivity analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(7):171-179. (in Chinese)
- 16 韩飞飞, 赵继, 张雷, 等. 数控机床几何精度综合解析与实验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(21):141-148.
- 17 余治民, 刘子建, 艾彦迪, 等. 大型数控龙门导轨磨床几何误差建模与基于可靠性理论的精度分配[J]. 机械工程学报, 2013, 49(17):142-151.
YU Zhimin, LIU Zijian, AI Yandi, et al. Geometric error model and precision distribution based on reliability theory for large CNC gantry guideway grinder [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(17):142-151. (in Chinese)
- 18 高猛, 李铁民, 尹文生, 等. 一种基于相关性分析的并联机床标定方法[J]. 机械工程学报, 2005, 41(1):88-92.
- 19 CHEN J S. Computer-aided accuracy enhancement for multi-axis CNC machine tool [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1995, 35(4):593-605.
- 20 FENG B, ZHANG D, YANG J, et al. A novel time-varying friction compensation method for servomechanism [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015(2015):1-16.
- 21 粟时平, 李圣怡, 王贵林. 基于空间误差模型的加工中心几何误差辨识方法[J]. 机械工程学报, 2002, 38(7):121-125.
- 22 ISO 230-4 Test code for machine tools-part 4: circular tests for numerically controlled machine tools [S]. 2005.
-

(上接第 382 页)

- 13 ICHWAN B, MAZLAN S A, IMADUDDIN F, et al. Development of a modular MR valve using meandering flow path structure [J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(3):037001.
- 14 IMADUDDIN F, MAZLAN S A, ZAMZURI H, et al. Testing and parametric modeling of magnetorheological valve with meandering flow path [J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 85(1):287-302.
- 15 FATAH A, YASSER A, MAZLAN S A, et al. Design of magnetorheological valve using serpentine flux path method [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 50(1):29-44.
- 16 IMADUDDIN F, MAZLAN S A, ZAMZURI H, et al. Design and performance analysis of a compact magnetorheological valve with multiple annular and radial gaps [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(9):1038-1049.
- 17 IMADUDDIN F, MAZLAN S A, RAHMAN M A A, et al. A high performance magnetorheological valve with a meandering flow path [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(6):1-11.
- 18 HU G, LONG M, HUANG M, et al. Design, analysis, prototyping, and experimental evaluation of an efficient double coil magnetorheological valve [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6:403410.
- 19 HU G, LONG M, YU L, et al. Design and performance evaluation of a novel magnetorheological valve with a tunable resistance gap [J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(12):127001.
- 20 胡国良, 李海燕, 张海云. 圆环流磁流变阀压降性能分析与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3):381-388.
HU Guoliang, LI Haiyan, ZHANG Haiyun. Performance analysis and experimental tests of pressure drop of annular type magnetorheological valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3):381-388. (in Chinese)
- 21 胡国良, 李海燕, 李卫华. 径向流和圆环流磁流变阀压降性能对比与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4):364-371, 405.
HU Guoliang, LI Haiyan, LI Weihua. Comparison and experiment of pressure drop of radial and annular type magnetorheological valves [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(4):364-371, 405. (in Chinese)
- 22 NGUYEN Q H, HAN Y M, CHOI S B, et al. Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(6):2242-2252.
- 23 NGUYEN Q H, CHOI S B, WERELEY N M. Optimal design of magnetorheological valves via a finite element method considering control energy and a time constant [J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(2):1-12.
- 24 NGUYEN Q H, CHOI S B, LEE Y S, et al. An analytical method for optimal design of MR valve structures [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(9):1088-1100.
- 25 NGUYEN Q H, CHOI S B, LEE Y S, et al. Optimal design of high damping force engine mount featuring MR valve structure with both annular and radial flow paths [J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(11):115024.